中速磁浮列车试验线地面牵引系统

查小菲　刘曰锋　张　丽　潘龙玉
（中车唐山机车车辆有限公司　唐山　063000）



查小菲　男　1983年生，高级工程师，主要从事磁悬浮车辆总体设计技术研究。



刘曰锋　男　1980年生，高级工程师，主要从事磁悬浮车辆总体设计技术研究。

摘要：新型中速磁浮列车采用基于 Halbach 磁体的长定子永磁直线同步电机牵引系统，具有能耗低、爬坡能力强及转弯半径小等优点。在时速 150 ～ 250km 的交通系统中具有广阔的应用前景。本文主要介绍中速磁浮列车试验线牵引系统研制及试验情况，包括中速磁浮列车结构特点、地面牵引系统原理及组成、试验线测试结果等。

关键词：中速磁浮列车　地面牵引系统　Halbach 磁体　长定子永磁直线同步电机
中图分类号：U292.91+7

The Applied Research of Ground Traction System About Magnetically Levitated Train with Medium Speed

Zha Xiaofei　Liu Yuefeng　Zhang Li　Pan Longyu
（Research and Development Centre, CRRC Tangshan Co., Ltd.　Tangshan　063000　China）

Abstract: The system of new magnetically levitated train with medium speed, which is adopting long-stator permanent magnet linear synchronous motor based on Halbach, can need low power, well-done in climbing slope, small turning radius. The system could have limitless applications in the public transportation during 150~250km area. The paper described the design and experiment about traction system of magnetically levitated train with medium speed, which introduces features of structure, test results, principle and constitute of magnetically levitated train with medium speed.

Keywords: Magnetically levitated train with medium speed, ground traction system, Halbach ,long-stator permanent magnet linear synchronous motor

1　引言

磁浮列车是一种非接触式地面轨道交通运输工具，其以安全、舒适且环保等优点越来越受到人们的关注。与传统的轮轨式机车车辆不同，磁浮列车的支撑和导向力是由车辆与轨道间的电磁吸力或电动斥力来提供，牵引力是由直线电机产生。

按照悬浮原理不同，磁浮列车系统可分为电磁悬浮和电动悬浮两种。按照驱动电机种类不同，磁浮列车牵引电机又可分为长定子直线同步电机和短定子直线异步电机两种。前者主要用于高速磁浮列车牵引；后者由于边端效应的存在，电机效率低，牵引力随着速度升高下降严重，因此主要用于时速100km以下的低速列车驱动系统中。目前世界上已投入运营的磁浮列车系统主要包括上海高速磁浮示范线及日本爱知、韩国仁川、长沙黄花机场等3条低速磁浮试验线。上述4个磁浮列车系统均采用常导电磁悬浮系统。上海高速磁浮列车安装有附加的导向电磁铁，通过主动的导向控制保证车辆横向稳定性，但结构较为复杂，车辆自重较大。低速磁浮列车采用悬浮导向一体的U型电磁铁，结构更为简单。

新型的中速磁浮列车采用电磁悬浮技术和Halbach磁体的长定子永磁直线同步电机，既保持了原低速磁浮的结构简洁、噪声低、转弯半径小和爬坡能力强等优势，同时又弥补了原低速车牵引效率低、牵引能耗低等不足，在时速150～250km的交通系统中具有广阔的应用前景。

磁浮列车的关键技术是牵引技术、悬浮导向技术和车辆结构技术，而安全、可靠且经济合理的电气系统是实现磁浮列车安全可靠运行的重要保证和前提。

本文主要介绍中速磁浮列车试验线牵引系统研制及试验情况，主要包括中速磁浮列车结构特点、地面牵引系统原理及组成和试验线测试结果等。

2　中速磁浮列车系统原理及结构特点

如图1所示，新型的中速磁浮列车悬浮系统采用和低速磁浮交通系统类似的常导电磁吸引型EMS悬浮系，通过U型悬浮磁铁与F型轨道两翼的电磁吸力作用实现列车悬浮及横向导向，有利于减重，降低复杂度，提高可靠性。

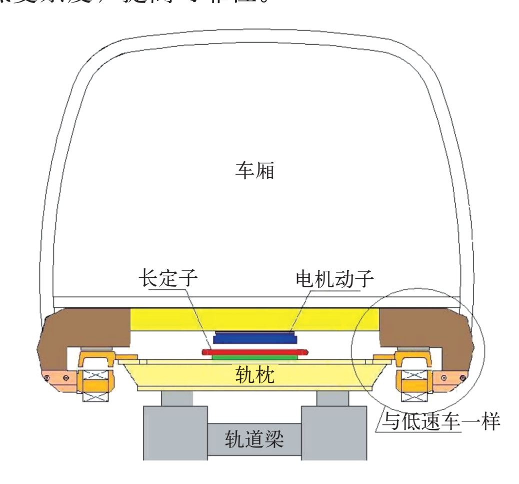


图1　中速磁浮列车结构示意图

Fig.1　The features of structure about magnetically levitated train with medium speed

车辆采用Halbach磁体的长定子永磁直线同步电机进行驱动。由多块不同充磁方向的Halbach磁体构成的电机动子（次级）安装在车辆转向架中间位置。电机的定子电枢绕组沿轨道中间敷设。

对于磁浮列车牵引电机，电机的法向力是衡量电机性能的一个重要指标。如图2所示，为减小电

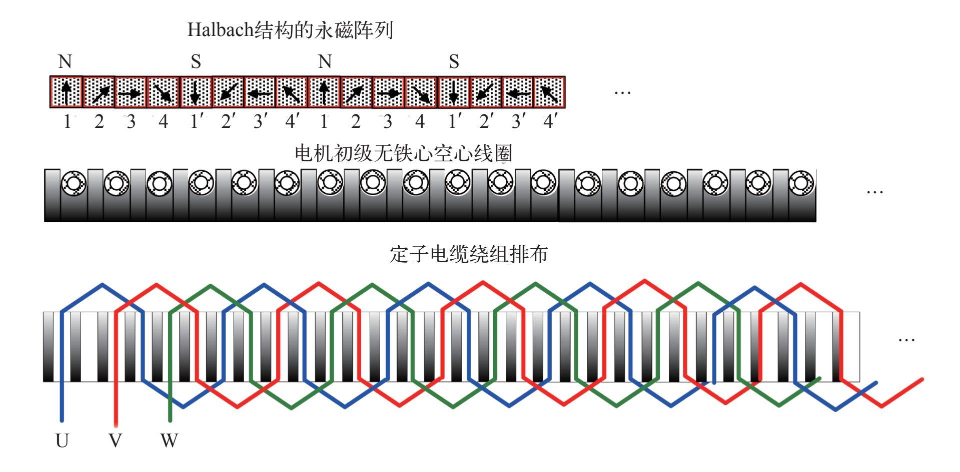


图2　Halbach永磁长定子直线同步电机结构及绕组排布示意图

Fig.2　The features of structure and windings assignment about Long-stator PMLSM based on Halbach

机法向力对悬浮系统的影响，电机地面定子采用无铁心、单层链式结构。对电机的力分析表明，若能得到标准的正弦气隙磁密，则极大地减小电机的波动。采用常规磁体结构时不能得到理想的正弦波气隙磁密分布。为此将 Halbach 磁体结构应用于永磁电机，不仅可以使气隙磁密正弦化，而且气隙磁通也会增加，这意味着电磁牵引力增大。如图 3 所示，相邻的两个 Halbach 永磁块的充磁角度差 45°，8 个永磁块构成一对动子极。

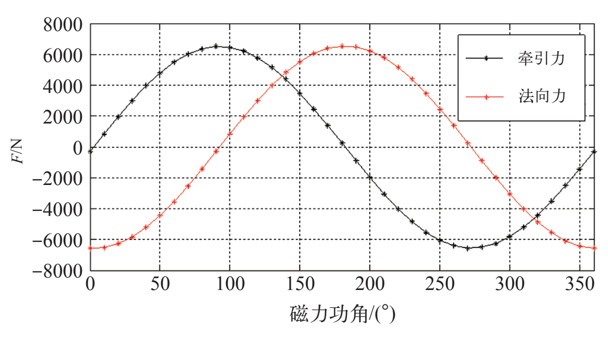


图 3 Halbach 永磁长定子直线同步电机牵引力和法向力功角特性

Fig.3 The traction and normal force of power angle about long-stator PMLSM based on Halbach

按照电机设计尺寸参数，在电机额定相电流有效值为 1 200A 条件下，单台电机的牵引力和法向力功角特性如图 3 所示，可以看出，电机的牵引力和法向力特性角相差 90°。在 90° 功角运行条件下，牵引力达到最大值，而法向力基本为零，从而最大程度上减小了法向力对悬浮系统的影响。

3 中速磁浮列车地面牵引系统

为对新型中速磁浮列车系统进行原理验证，研制了一台单悬浮架试验车辆，并建设了一条 204m 长的中速磁浮列车试验线。试验线和车辆实物图如图 4 所示。



图 4 204m 中速磁浮列车试验线及单悬浮架试验车辆

Fig.4 The test line and train of magnetically levitated train with 204m

地面牵引系统采用 DC750V 供电，由高压电器柜、牵引逆变器、制动电阻、馈电电缆、轨旁开关柜和长定子直线同步电机组成。变电站提供的直流电，通过高压电器柜进入牵引逆变器，再经过牵引逆变器逆变成频率和电压幅值都可变的 VVVF 电源，给长定子直线同步电机初级三相绕组供电。由直线同步电机产生列车前进的牵引力或电制动力。

牵引变流器主电路工作原理如图 5 所示。

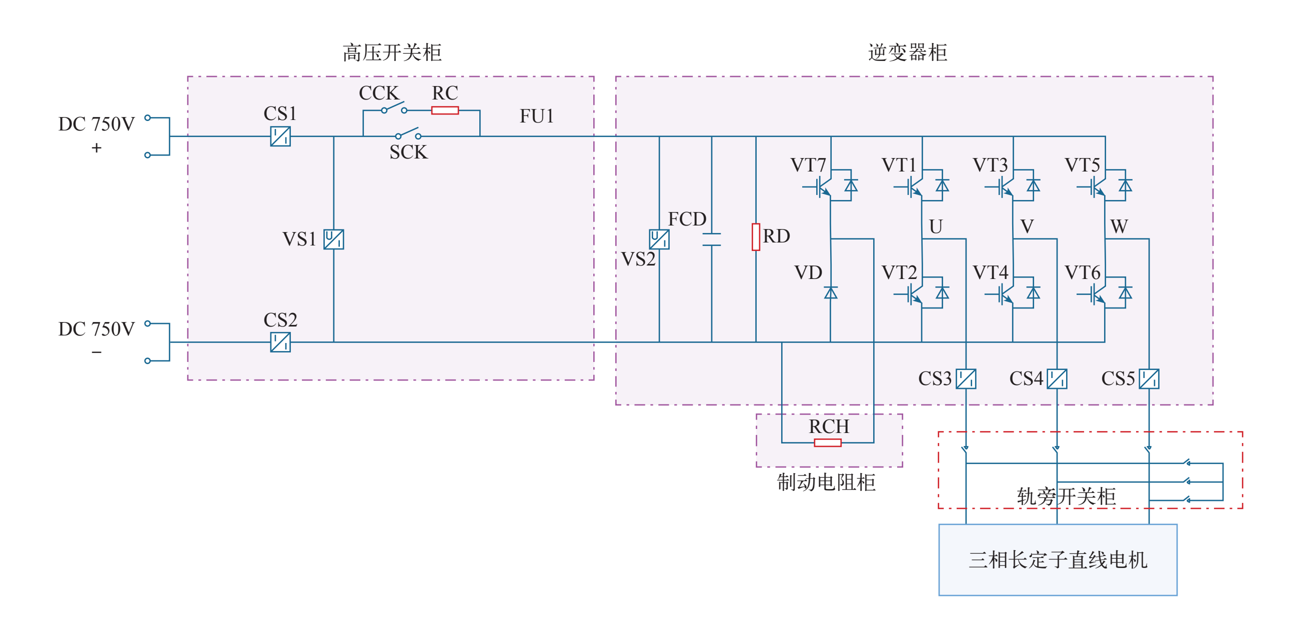


图 5 长定子永磁直线同步电机牵引变流系统结构框图

Fig.5 The conversion system of traction system about long-stator PMLSM based on Halbach

牵引变流器电气参数如下：

高压柜：额定输入电压为DC550 ～ 900V；额定输入电流为900A；防护等级为IP20。

逆变柜：额定输入电压为DC550 ～ 900V；输出电压为AC0 ～ 660V；额定输入电流为900A；额定输出电流为1 200A；瞬时输出峰值电流为1 400A；输出频率为0 ～ 50Hz；开关频率为500 ～ 1 000Hz；防护等级为IP20。

制动电阻柜：额定制动功率为250kW/2.5Ω；过载能力为6倍；制动开起电压为DC841V；制动关闭电压为DC799V；触发方式为自动触发；瞬时制动功率为1 500kW；防护等级为IP20。

高压开关柜主要作用是将外部输入直流电压通过充电回路送入逆变柜，此外当逆变侧或直流输入侧出现故障时，高压柜的高速开关断开，进而起到故障隔离及保护作用。

高压柜组成部件如图3所示，两个电流传感器CS1、CS2组合构成接地检测传感器，VS1检测直流输入电压，CCK、RC构成充电回路，SCK为主接触器，FU1为熔断器。

逆变柜是长定子永磁直线同步电机牵引变流系统的核心部件，主要功能是根据外部指令，将直流母线电压转化为电压频率可变的三相交流电压，实现对电机牵引、车辆的速度及位置的实时闭环控制。

如图2所示，逆变器主电路采用两电平电压型直－交逆变电路，VS2检测电容器电压，FC是直流支撑电容，CS3 ～ CS5分别检测逆变器输出三相电流。逆变单元集成了7个1 700V/2 400A的IGBT元件作为三相逆变器的三相桥臂及制动相桥臂，模块还包括散热器及风机、温度传感器和驱动单元低感母排等部件。

牵引控制单元与驱动单元间的信号传输通过光纤实现，光纤的应用容易解决高压隔离，并使抗干扰性能得到提高。

IGBT元件的最高运行结温为150℃，但其允许的耗散功率及通态电流与结温成反比，通常认为运行结温应控制在125℃以下，壳温在100℃以下，考虑到安全性及留有一定的裕量，将结温控制在110℃以下，并设置温度保护。

与直线异步电机不同，永磁直线同步电机在出现运行故障或供电断电时，永磁体产生的反电势可能损坏器件，因此制动电阻柜不仅用于车辆再生制动的能量消耗，同时也为变流器提供安全保护作用。

对于长定子直线同步电机驱动的磁浮列车系统，当线路中轨道较长时，牵引供电系统采用多分区供电模式——采用轨旁开关站完成不同分区的供电切换。对于204m线长定子永磁直线同步电机变流器系统，轨旁开关柜由两套开关系统组成，一套供牵引控制系统进行远程投切操作使用；另一套在紧急制动工况下对定子三相绕组进行短接，进而实现涡流制动功能。轨旁开关柜在线路长定子电缆检测维护时也起到安全防护作用。

牵引逆变器设有过电压、欠电压、过电流、过载、短路、接地、缺相、三相电流不平衡和过热等保护。当过电压、欠电压或短路、接地、缺相等故障发生时，封锁逆变器，断开高速开关。过电流、过载或过热时首先降功运行，如故障依然存在，封锁逆变器，断开高速开关。

在两相旋转坐标系（dq）下，长定子直线同步电机的动态等效数学模型如下

$$u_{ds} = (R_s + R_{ca})i_{ds} + p\Psi_{ds} - \Psi_{qs}\pi v/\tau \tag{1}$$

$$u_{qs} = (R_s + R_{ca})i_{qs} + p\Psi_{qs} + \Psi_{ds}\pi v/\tau \tag{2}$$

$$\Psi_{ds} = (L_{dqs} + L_{ca})i_{ds} + \Psi_f \tag{3}$$

$$\Psi_{qs} = (L_{dqs} + L_{ca})i_{qs} \tag{4}$$

$$F_x = \frac{3}{2}\frac{\pi}{\tau}\Psi_f i_{qs} \tag{5}$$

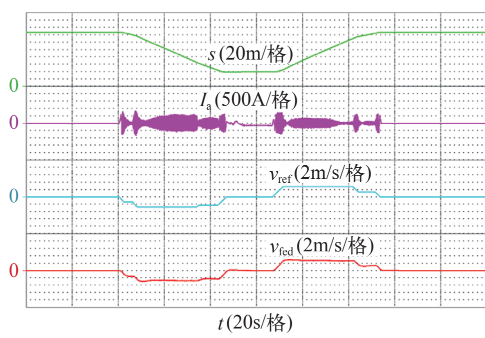
式中，u_{ds}、u_{qs}分别为d、q轴定子相电压；i_{ds}、i_{qs}分别为d、q轴定子相电流；Ψ_{ds}、Ψ_{qs}分别为d、q轴定子磁链；R_s、R_{ca}分别为定子绕组和馈电电缆一相电阻；L_{dqs}、L_{ca}分别为定子绕组和馈电电缆漏电感；Ψ_f为Halbach磁体励磁磁链。

根据上述动态数学方程，牵引控制系统采用磁场定向完成长定子永磁直线同步电机的实时牵引力、速度及位置的闭环控制。由式（5）可知，当采用$I_d = 0$的磁场定向控制策略时，可以实现单位电流最大牵引力输出控制，由图3可知，在增大牵引力输出的同时减小了法向力对悬浮系统的影响。

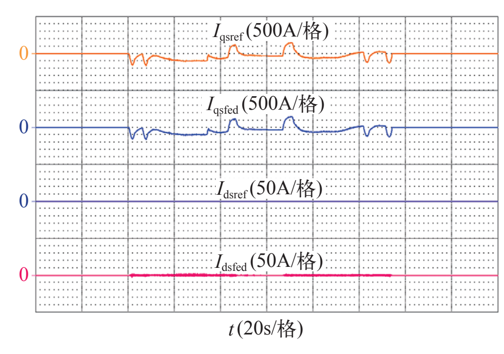
4　试验线测试结果

所研制的地面牵引系统已安装在204m长的中速磁浮列车试验线，驱动单悬浮架试验车辆完成了最高速度20km/h全线运行试验测试，部分结果如图6所示。

图6为最高速度为20km/h的牵引制动全过程试验波形，图中，s为车辆运行位置曲线，I_a为A相电流，v_{ref}、v_{fed}分别为速度指令及反馈。I_{dref}、



（a）列车位置、电机相电流、速度指令与反馈值



（b）dq 轴电流指令和反馈值

图 6　最高速度 20km/h 牵引制动运行试验波形

Fig.6　The test waves of propulsion and braking system at the top speed which is 20km/h

I_{dfed}、I_{qref}、I_{qfed} 指电机 d 轴和 q 轴电流指令和反馈值。可以看出，整个运行过程电机速度、dq 轴电流反馈均可精确跟踪指令值，牵引制动过渡过程稳定。

运行过程中，由于试验车辆重量较轻，因此在加速度一定的条件下，变流器最大输出峰值电流为 1 000A，并未达到设计最大输出值。电机 d 轴电流始终保持在 0 附近，牵引系统对悬浮系统的影响基本可以忽略。

5　结论

中速磁浮列车采用电磁悬浮技术和 Halbach 磁体的长定子永磁直线同步电机，既保持了原低速磁浮的结构简洁、噪声低、转弯半径小和爬坡能力强等优势，同时弥补了原低速车牵引效率低、牵引能耗低等不足，在时速 150 ～ 250km 的交通系统中具有广阔的应用前景。

本文对当前中速磁浮列车试验线牵引系统研制及试验情况进行介绍。后续还将开展面向 200km 时速的多分区中速磁浮列车牵引系统研制工作，进而为新型中速磁浮列车的推广应用奠定基础。

参考文献

[1]　刘恒坤，张晓，弥柱．空心和 Halbach 永磁直线同步电机的牵引力和法向力分析 [J]．国防科技大学学报，2012，34(3)：94-97．

Liu Hengkun, Zhang Xiao, Mi Zhu. Analytical computation of normal and tangential forces in linear synchronous motor with air-core and Halbach permanent magnets[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3): 94-97.

[2]　Zhang Z, Shi L, Ge Q, et al. Characteristics analysis of single-sided ironless linear synchronous motor based on permanent magnet halbach array[C]. International Conference on Electrical Machines & Systems, 2015: 275-278.